

# O wpływie imperfekcji geometrycznych na naprężenia w powłokach walcowych

W artykule przedstawiono wyniki analizy wpływu imperfekcji geometrycznych w płaszczach zbiorników stalowych na ciecze. Analiza dotyczy w szczególności zbiorników magazynowych o osi pionowej, z dachem pływającym, o pojemności nominalnej 50 000 m<sup>3</sup>, wykorzystywanych do przechowywania produktów naftowych [1].

Imperfekcje płaszcza zbiornika są przyczyną zmiany rozkładu strumieni sił wewnętrznych, a tym samym naprężeń w powłoce. Stanowią one zagrożenie bezpiecznej eksploatacji i są potencjalnie powodem występowania takich zjawisk, jak:

- podatność na wyboczenie płaszcza pod wpływem sił ściskających,
- lokalna utrata stateczności fragmentu powłoki,
- lokalne przeciążenie głównego elementu nośnego konstrukcji zbiornika, jakim jest płaszcz.

Imperfekcje geometryczne wpływają nie tylko na nośność i wytrzymałość eksploatowanych obiektów, ale również na warunki użytkowania samych zbiorników, w szczególności zbiorników z dachami pływającymi. Niejednokrotnie charakter i układ odchyłek geometrycznych objawiają się w trakcie eksploatacji nagłymi przeskokami pewnych fragmentów powłoki płaszcza podczas procesu opróżniania i napełniania zbiornika. Przeskoki te polegają na całkowitej zmianie charakteru imperfekcji, np. z ujemnej na dodatnią i odwrotnie. Efekty takie są szczególnie niebezpieczne, gdyż wpływają znacząco na zmianę wytrzymałości materiału oraz nośność spoin.

Problem oceny stanu deformacji powłoki płaszcza zbiornika występuje nie tylko podczas odbioru i przekazywania nowego zbiornika do eksploatacji. W trakcie eksploatacji mogą powstać zmiany kształtu powłoki, spowodowane na przykład nierównomiernym osiadaniami obiektu. Zawsze wtedy pojawia się pytanie: w jakim stopniu stwierdzone imperfekcje geometryczne wpływają na stan wytrzymałości przekroju? Pytanie to nabiera większego znaczenia, gdy dotyczy zbiorników po kilkadziesiąt lat eksploatacji, w których oprócz defektów geometrycznych występują uszkodzenia korozyjne, związane z ubytkiem grubości blach lub też znaczną korozją wżerową.

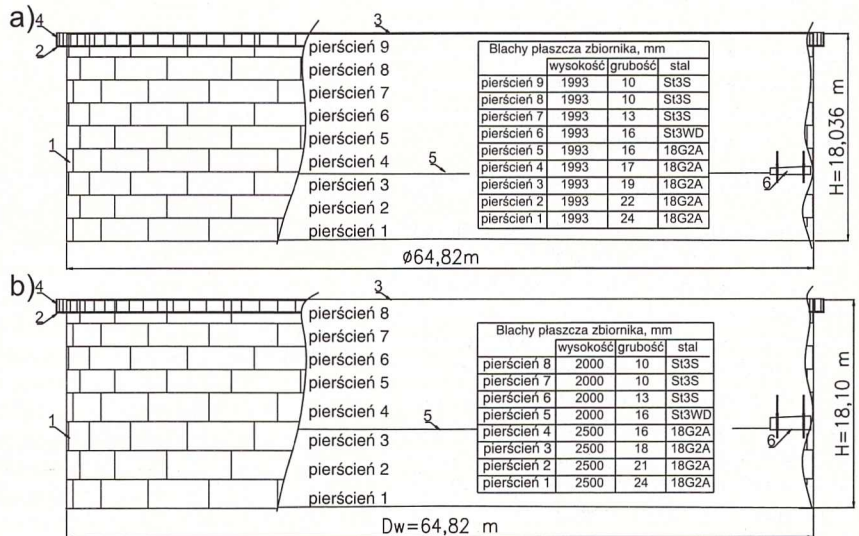
## Konstrukcja analizowanych zbiorników

Zasadniczymi elementami konstrukcji analizowanego typu zbiornika jest stalowe dno oraz płaszcz (rys. 1). Dno zbiornika składa się z dwóch części: środkowej i pierścienia obrzeżnego. Część środkowa stalowego dna jest wykonana z blach grubości 8 mm. Blachy te są ułożone bezpośrednio na fundamencie piaskowym. Ta część dna zbiornika jest otoczona pierścieniem obrzeżnym, z blach grubości 16 mm. Pierścień ten spoczywa na fundamencie piaskowym w swojej części wewnętrznej, a na obwodzie zewnętrznym – na żelbetowym pierścieniu fundamentowym (rys. 2). Blachy dna są łączone w stykach po-

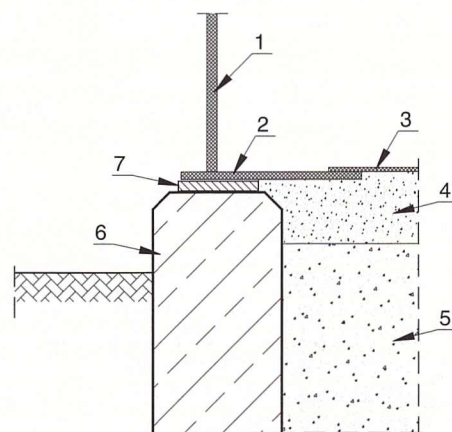
przecznych spoinami czołowymi z zastosowaniem podkładek; styki podłużne są wykonane na zakład z zastosowaniem spoin pachwinowych. Część środkowa dna zbiornika z pierścieniem obrzeżnym jest łączona na zakład spoiną pachwinową. Dno zbiornika wykonano z dwóch gatunków stali: część środkową ze stali niestopowej znaku St3SY, a część zewnętrzną – ze stali niskostopowej znaku 18G2A.

Płaszcz zbiornika jest wykonany z pierścieni stalowych, na które wykorzystano stal:

- niskostopową znaku 18G2A – na cztery dolne pierścienie płaszcza,
- niestopową znaku St3S – na wyższe pierścienie płaszcza.



Rys. 1. Konstrukcja analizowanych zbiorników: a) płaszcz z 9 pierścieni poziomych, b) płaszcz z 8 pierścieni poziomych; 1 – płaszcz zbiornika, 2 – stężenie wiatrowe (pomost komunikacyjny), 3 – kątownik wieńczący, 4 – barierka ochronna na stężeniu wiatrowym, 5 – membrana dachu pływającego, 6 – ponton dachu pływającego



Rys. 2. Konstrukcja fundamentu: 1 – płaszcz zbiornika, 2 – pierścień obrzeżny dna, 3 – wewnętrzna część dna stalowego, 4 – poduszka piaskowa nasączona olejem, 5 – fundament żwirowo-piaskowy, 6 – pierścień żelbetowy, 7 – elastyczna przekładka

Plaszcz składa się z ośmiu lub dziewięciu pierścieni (w zależności od okresu budowy zbiornika) o skokowo zmiennej grubości blach dostosowanych do liniowego rozkładu obciążenia. Liczba pierścieni zależy od przyjętej szerokości stosowanych arkuszy blach, ograniczonej możliwościami technologicznymi przemysłu hutniczego, założeniami projektowymi oraz techniczno-organizacyjnymi robót montażowych. Grubość arkuszy blach poszczególnych pierścieni przedstawiono na rys. 1. Blachy płaszcz są łączone spoinami czołowymi, zarówno w stykach pionowych, jak i poziomych. Połączenie pomiędzy płaszczem a dnem wykonano z zastosowaniem obustronnej spoiny pachwinowej. Płaszcz zbiornika zwieńczono w górnej części kątownikiem 100 × 100 × 10 mm w celu usztywnienia krawędzi swobodnej. Ważnym elementem omawianego typu zbiornika jest stężenie wiatrowe. Spełnia ono szczególnie istotną rolę w momencie, gdy dach pływający znajduje się w najniższym możliwym położeniu, czyli przy pustym zbiorniku. Stężenie wiatrowe jest montowane na ostatnim pierścieniu płaszczu zbiornika, w odległości 1,1 m od jego krawędzi górnej. Stężenie to, spawane z blach, jest wykorzystywane przez obsługę jako pomost komunikacyjny.

Występują również inne elementy, które są związane z wyposażeniem technologicznym. Można tu wymienić: włazy – wejściowe, wyczystkowe, wentylacyjne, króćce – produktowe, pomiarowe, oraz elementy zapewniające odpowiednie ciągi komunikacyjne – schody, drabiny, pomosty.

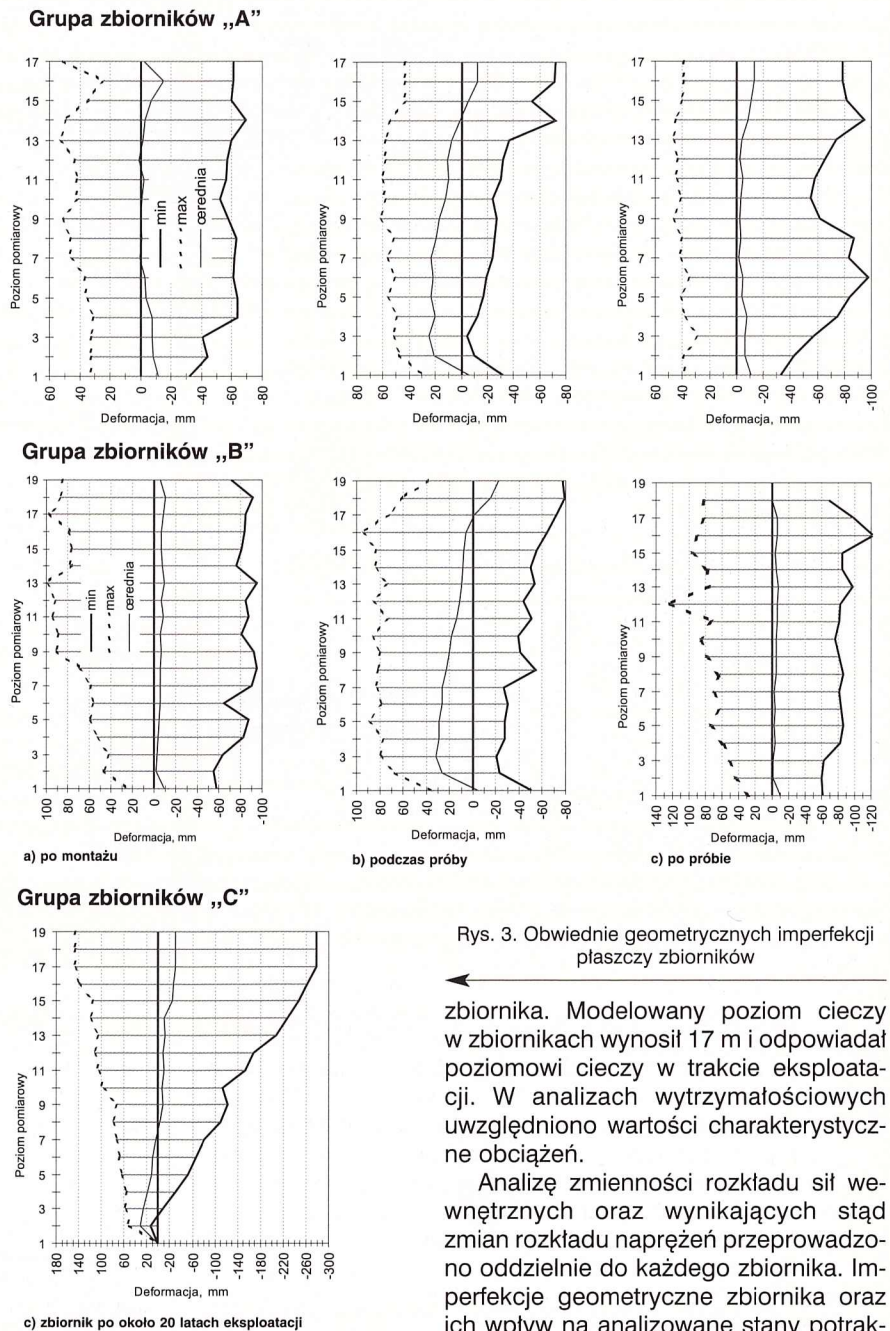
**Stan deformacji płaszczu zbiorników**

Deformacje powłok płaszczu analizowanej grupy zbiorników określono na podstawie geodezyjnych pomiarów zbiorników przekazywanych do eksploatacji. Pomiary wykonano na 40 pionach pomiarowych, równo rozmieszczonych na obwodzie zbiornika. W każdym pionie pomiarowym dokonano pomiaru w połowie wysokości każdego pierścienia oraz na poziomie styków spawanych pomiędzy poszczególnymi pierścieniami. Pomiary wykonano w trzech fazach, odpowiadających następującym etapom kontroli jakości geometrycznej wykonania płaszczu zbiorników:

- bezpośrednio po zakończeniu prac montażowych,
- w czasie próby wodnej zbiornika wypełnionego wodą do poziomu eksploatacyjnego,
- po zakończeniu próby wodnej, czyli po jednokrotnym pełnym napełnieniu zbiornika.

W analizie wykorzystano wyniki pomiarów dwunastu nowych zbiorników oraz jednego zbiornika eksploatowanego ponad 20 lat. Na rysunku 3 przedstawiono wykresy obwiedni geometrycznych imperfekcji płaszczu zbiorników. Wartości tych obwiedni podano jako odchyłki od zakładanej w projekcie geometrii idealnej. Prezentowane wartości zostały zgrupowane ze względu na niewielkie różnice czasu budowy (A, B) oraz okresu wykonania pomiarów (C). Ilościowy rozkład wartości imperfekcji geometrycznych zbiorników podano w pracach [3, 4, 5].

Analizę numeryczną zdeformowanych powłok płaszczu zbiorników przeprowadzono wykorzystując pakiet obliczeniowy MSC. NASTRAN. Na podstawie wyników pomiarów geodezyjnych i specjalnie opracowanego autorskiego programu komputerowego wygenerowano kompleksowe numeryczne modele obiektów rzeczywistych. Uwzględniono specyficzne warunki niedoskonałości geometrycznych powłoki płaszczu oraz podparcie na fundamencie o skokowo zmiennej sztywności. Komputerowy model zbiornika składał się z dwustu tworzących, rozmieszczonych równomiernie na obwodzie. Współrzędne brakujących węzłów pośrednich określono na podstawie interpolacji pomiędzy wartościami z pomiarów geodezyjnych. Do modelowania konstrukcji użyto izoparametrycznych elementów czterowęzłowych typu płytowego, w których równania opisują cechy stanu tarczowego i giętnego (QUAD4). Analizowane modele obciążano parciem hydrostatycznym cieczy na powierzchnie wewnętrzne płaszczu oraz dno

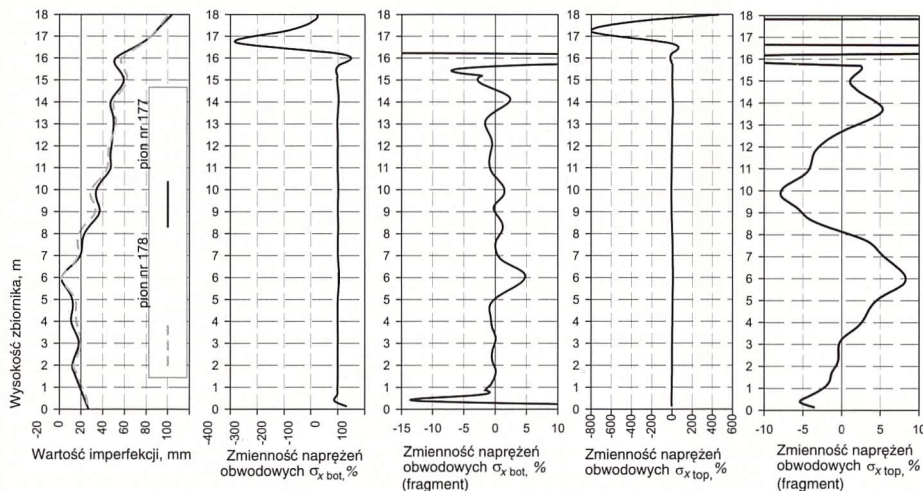


Rys. 3. Obwiednie geometrycznych imperfekcji płaszczu zbiorników

zbiornika. Modelowany poziom cieczy w zbiornikach wynosił 17 m i odpowiadał poziomowi cieczy w trakcie eksploatacji. W analizach wytrzymałościowych uwzględniono wartości charakterystyczne obciążenia.

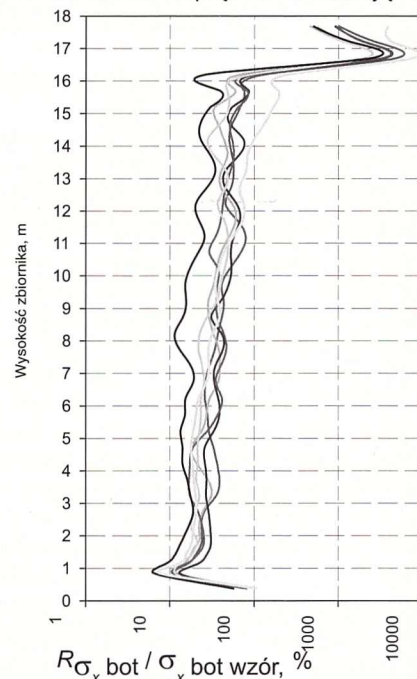
Analizę zmienności rozkładu sił wewnętrznych oraz wynikających stąd zmian rozkładu naprężeń przeprowadzono oddzielnie do każdego zbiornika. Imperfekcje geometryczne zbiornika oraz ich wpływ na analizowane stany potrak-

towano globalnie w celu określenia obwiedni poszukiwanych wielkości statycznych i wytrzymałościowych. Analiza indywidualna każdej pojedynczej imperfekcji czy też każdego pionu lub poziomu na stan zbiornika jest bardzo trudna z powodu różnego ukształtowania otoczenia danej wady geometrycznej. Aby to zobrazować, przedstawiono przykładowe zestawienia rozkładów naprężeń (rys. 4) w losowo wybranym zbiorniku. Pionowe pasmo podziału elementowego płaszcza zbiornika zostało dobrane w sposób losowy. W celu uchwycenia szczegółów zmienności analizowanych rozkładów, niektóre wielkości



Rys. 4. Zestawienie rozkładu naprężeń (bot – powierzchnia zewnętrzna, top – wewnętrzna)

fekcji na stan zaburzeń brzegowych jest spowodowany dodatkową sztywnością wspomnianych elementów. Pomijając te fragmenty zaburzeń można podać, że w zakresie zachowania się płaszcza jako konstrukcji powłokowej zmienności poszczególnych analizowanych wielkości naprężeń kształtują się w granicach podanych w tabl. 2. Szczególnie duże procentowe wartości niektórych pre-



Rys. 5. Zakresy zmienności siły obwodowej

przedstawiono na dwóch wykresach. Na jednym zilustrowano cały zakres zmienności danej wielkości. Takie zestawienie pozwala na zobrazowanie zmienności analizowanych wielkości w układzie całego ich zakresu jak i wybranych fragmentów, które są słabo przedstawione na wykresie obejmującym pełen zakres zmienności prezentowanej wielkości. Stan deformacji powłoki odpowiadający warunkom geometrycznym na krawędziach pionowych wybranego pionowego pasma elementowego został przedstawiony jako pierwszy wykres. Krzywa ciągła tego wykresu przedstawia warunki początkowe, przerywana – końcowe brzegowe warunki geometryczne siatki podziału elementowego wybranego pasma.

Wyniki analizy zakresu zmienności analizowanych wielkości poszczególnych zbiorników są kolejnym etapem oceny zmian powodowanych przez imperfekcje. Przykładowe wykresy prezentowane na rys. 5 opracowano na podstawie różnicy wartości maksymalnych i minimalnych z obwiedni poszczególnych wielkości, w stosunku do wartości wzorcowej wg wzoru

$$\left[ \frac{(X_{\max} - X_{\min})}{X_{\text{wzór}}} \right] \cdot 100\%, \quad (1)$$

w którym:

- $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$  – odpowiednio minimalna i maksymalna wartość analizowanej wielkości statycznej określonej na poszczególnych obliczeniowych poziomach,
- $X_{\text{wzór}}$  – wielkość wzorcowa na poszczególnych poziomach obliczeniowych dotycząca zbiornika bez imperfekcji geometrycznych.

Przedstawione na rys. 5 oraz w tabl. 1 i 2 procentowe zakresy zmienności naprężeń i sił wewnętrznych wskazują na ogólną tendencję zwiększania ich wartości wraz z wysokością zbiornika. Odpowiada to faktowi zwiększenia się zakresów zmienności odchyłek geometrycznych płaszcza wraz z jego wysokością. Można też zauważyć znaczny wzrost zmienności analizowanych wartości w części przyległej do dna zbiornika oraz pierścienia wiatrowego. W miejscach tych wpływ imper-

Tablica 1  
Zakresy zmienności sił wewnętrznych

Wielkość statyczna	Procentowy zakres zmienności dotyczący zbiorników z grupy	
	„A”	„B+C”
$F_x$	3 ÷ 25	3 ÷ 30
$F_y$	-200 ÷ -5000	-1500 ÷ -10000
$M_y$	-60 ÷ 100	-80 ÷ 800
$Q_y$	-70 ÷ 250	-80 ÷ 600

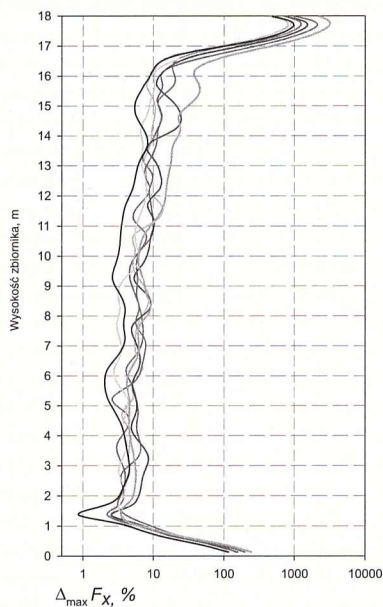
Tablica 2  
Zakresy zmienności naprężeń

Naprężenie	Procentowy zakres zmienności dotyczący zbiorników z grupy	
	„A”	„B+C”
$\sigma_x \text{ bot}$	5 ÷ 40	2 ÷ 55
$\sigma_x \text{ top}$	5 ÷ 30	7 ÷ 45
$\sigma_y \text{ bot}$	10 ÷ 550	30 ÷ 350
$\sigma_y \text{ top}$	-50 ÷ 450	-30 ÷ 600
$\sigma_{HMH} \text{ bot}$	7 ÷ 25	7 ÷ 35
$\sigma_{HMH} \text{ top}$	4 ÷ 30	4 ÷ 45

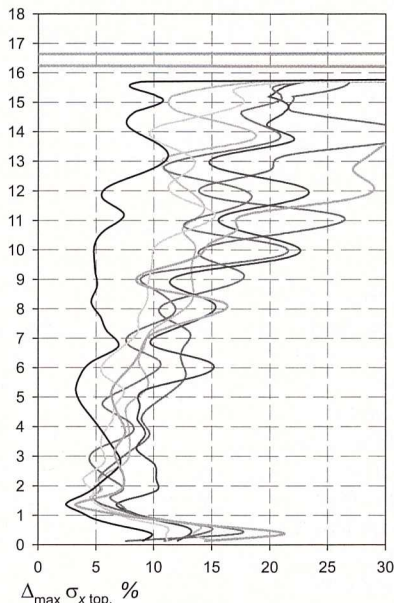
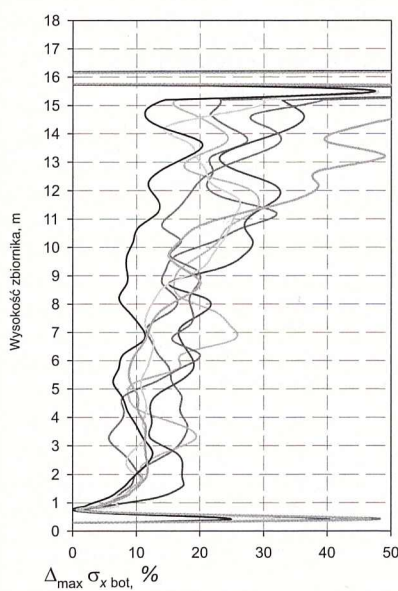
zentowanych wielkości są wynikiem znikomej wartości wzorcowej (niejednokrotnie bliskiej zera), służącej do standaryzacji analizowanej wielkości.

Ze względu na bezpieczeństwo eksploatacji obiektu i rezerwy nośności konstrukcji ważny jest przyrost wartości analizowanych sił wewnętrznych oraz naprężeń  $D_{\max} X$  ponad wartość sił i naprężeń określonych na podstawie norm projektowania (rys. 6, 7)

$$\Delta_{\max} X = \left[ \frac{(X_{\max} - X_{\text{wzór}})}{X_{\text{wzór}}} \right] \cdot 100\%. \quad (2)$$



Rys. 6. Procentowe zwiększenie wartości siły obwodowej



Rys. 7. Procentowe zwiększenie wartości naprężeń

Przedstawione wykresy procentowego zwiększenia sił wewnętrznych oraz naprężeń ponad określone obliczeniowo z uwzględnieniem wartości charakterystycznego obciążenia można prześledzić analizując dane tabl. 3.

Można stwierdzić, że zwiększenie sił obwodowych o wartościach maksymalnych 8÷12%, nie przekłada się wprost na jednakowe zwiększenie naprężeń obwodowych i zredukowanych, który w przypadku naprężeń obwodowych mieści się w granicach 12÷25% w przypadku grupy zbiorników oznaczonej symbolem „A”. Druga grupa zbiorników, oznaczona sym-

Tablica 3  
Zakresy maksymalnego zwiększenia naprężeń

Naprężenie	Procentowy zakres zmienności dotyczący zbiorników z grupy	
	„A”	„B+C”
$\sigma_{x\ bot}$	2÷25	0÷30
$\sigma_{x\ top}$	3÷12	3÷22
$\sigma_{HMH\ bot}$	4÷15	5÷20
$\sigma_{HMH\ top}$	2÷15	5÷25

bolem „B+C”, cechuje się znacznie większym zwiększeniem naprężeń obwodowych i zredukowanych.

W celu praktycznej weryfikacji wykonanej analizy numerycznej wykonano połowę badania tensometryczne zbiornika pojemności  $V = 12\ 000\ m^3$ . Zbiornik ten charakteryzował się znacznymi imperfekcjami kształtu płaszczka. Badania potwierdziły zróżnicowanie naprężeń w powłoce płaszczka, dotyczących poszczególnych poziomów pomiarowych, a także prawidłowość przeprowadzenia analiz numerycznych [10].

## Podsumowanie

Wykonane analizy numeryczne potwierdziły, że zwiększenie wartości imperfekcji geometrycznych powłoki oraz ich wzajemne zróżnicowanie powoduje rozrzut wartości sił i naprężeń w obrębie tych samych porównywanych poziomów wysokości zbiornika. Obwodnie wartości naprężeń obwodowych i zredukowanych w analizowanych zbiornikach o pojemności  $50\ 000\ m^3$  pozwalają stwierdzić, że nie występują przypadki przekroczenia stanu wytrzymałości obliczeniowych odpowiednich gatunków stali. Bezpieczeństwo eksploatacji obiektów jest więc zachowane.

Wartości dopuszczalnych odchyłek odbiorczych, dotyczących geometrii płaszczka zbiornika określone w polskich przepisach normowych [2] nie budzą zastrzeżeń.

Również wartości dopuszczalnych imperfekcji geometrycznych podane w przepisach normowych [2, 6, 7, 8] są określone prawidłowo. Należy jednak wspomnieć, że projekt Eurokodu [9] dotyczącego powłok stalowych podaje w formie bardzo uproszczonej sposób określenia jakości wykonania powłoki pod względem prawidłowości kształtu. Kryteria w niej podane są dużo mniej wymagające. Wszystkie analizowane zbiorniki, wg wspomnianej normy [9], spełniają warunki wykonania konstrukcji w zakresie klasy A.

Analiza wytrzymałościowa konstrukcji zbiornikowych z imperfekcjami kształtu powinna uwzględniać ewentualne niskocyklowe zmęczenie materiału oraz wady materiałowe, jak i wykonania mające wpływ na lokalne zmiany stanu naprężenia i bezpieczeństwa konstrukcji.

## PIŚMIENICTWO I WYKORZYSTANE MATERIAŁY

- [1] Biuro Projektów CPN „Naftoprojekt”: Dokumentacje projektowe zbiorników z dachami pływającymi o pojemności  $V = 50\ 000\ m^3$ .
- [2] PN-B-03210:1997 Konstrukcje stalowe – Zbiorniki walcowe pionowe na cieczę – Projektowanie i wykonanie.
- [3] Kowalski D.: Naprężenia w płaszczku zbiornika stalowego z lokalnymi deformacjami. „Inżynieria i Budownictwo”, nr 6/2001.
- [4] Kowalski D.: Dokładność wykonawstwa konstrukcji zbiornikowych w ujęciu statystycznym i wytrzymałościowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 585/2001.
- [5] Kowalski D.: Jakościowa i ilościowa ocena odchyłek wykonania płaszczki zbiorników stalowych. Konferencja „Problemy eksploatacyjne baz magazynowych produktów naftowych”, Poznań 1999.
- [6] API Standard 650 Welded Steel Tanks for Oil Storage. American Petroleum Institute.
- [7] BS 2654:1984 British Standard Specification for Manufacture of vertical steel welded storage tank with butt welded shells for the petroleum industry.
- [8] DIN 4119, Teil 1 Jun 1979 Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen, Grundlagen, Ausführung, Prüfungen, Teil 2 Feb 1980 – Oberirdische zylindrische Flachboden-Tankbauwerke aus metallischen Werkstoffen, Berechnung.
- [9] EN 1993-1-6:2004 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.6: General Rules: Strength and Stability of Shell Structures.
- [10] Kowalski D.: Badania tensometryczne płaszczka zbiornika z imperfekcjami kształtu. Konferencja „Badania materiałów budowlanych i konstrukcji inżynierskich”. Wrocław 2004.